

# 基于 SAPB 的辐射井水平钻机方案设计研究

尹书学<sup>1</sup>, 高常青<sup>1</sup>, 徐征和<sup>2</sup>, 郑元松<sup>1</sup>, 孙建华<sup>1</sup>

(1. 济南大学机械工程学院, 山东 济南 250022; 2. 济南大学资源与环境学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** SAPB 设计方法是目前国际上应用较广的一种设计方法及理论, 该方法尤其是在产品的总体方案设计过程中, 发挥着举足轻重的作用。本文利用该方法对辐射井水平钻机的整体方案设计进行研究。首先从分析水平钻机的总功能的角度出发, 对钻机功能进行抽象化, 然后利用 SAPB 设计方法中的分析工具, 对总功能进行分解, 建立水平钻机的功能分解树和功能结构图, 最终得到钻机的整体设计方案。本文的研究可为钻机的进一步设计优化提供便利。

**关键词:** SAPB; 辐射井; 水平钻机; 方案设计; 功能分析

**中图分类号:** P634.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0103-05

**Scheme Design of Radiation Well Horizontal Drilling Machine Based on SAPB/YIN Shu-xue<sup>1</sup>, GAO Chang-qing<sup>1</sup>, XU Zheng-he<sup>2</sup>, ZHENG Yuan-song<sup>1</sup>, SUN Jian-hua<sup>1</sup>** (1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan Shandong 250022, China; 2. School of Resource and Environment, University of Jinan, Jinan Shandong 250022, China)

**Abstract:** Being a widely used design method and theory, SAPB plays an important role, especially in the process of the overall design of the product. In this paper, this method is used to study the overall scheme design of radiation well horizontal drilling rig. First of all, from the analysis on the general function of the horizontal drilling rig, abstract the drilling machine function, then decompose the total function with analysis tools of SAPB design method to establish functional decomposition tree and function structure diagram of the horizontal drilling rig, finally the rig overall design scheme is got. This research can provide the convenience for the further design optimization of the drilling machine.

**Key words:** SAPB; radiation well; horizontal drilling machine; program design; function analysis

## 0 引言

随着科学技术的飞速发展, 产品功能要求日益增多, 复杂性增加, 寿命期缩短, 更新换代速度加快, 这种形势对设计人员提出了更高的要求。设计是产品开发过程中首要和关键的环节, 产品设计可决定产品最终成本的 80% 以上<sup>[1]</sup>。而产品的方案设计是产品设计过程中的首要环节, 方案的优劣直接影响到产品性能的好坏, 因此在产品的方案设计阶段需要采用合理的设计方法, 以避免后期原理性问题的产生。

中国是世界上缺水的国家, 随着社会的快速发展, 淡水资源面临着严峻的挑战, 很多地方利用简单水井取水已经不能满足目前人们生活水平的需要。辐射井素有“浅井之王”美称<sup>[2]</sup>, 具有出水量大的显著特点, 在我国一些贫水地区得到大力发展。除此

之外, 辐射井也在城市地面沉降治理和基础降排水等领域得到广泛的应用, 如北京市用于地铁降水及地面沉降<sup>[3]</sup>, 滨州市的黄河滩地地下淡水开发<sup>[4]</sup>, 燃煤发电厂的灰坝渗漏治理<sup>[5]</sup>等工程。辐射井一词最早源于英国, 最初是用于回收残留在油田中的地下石油, 后来 Leo Ranney 把这种设计原理用于取水工程。1934 年英国伦敦利用该设计原理建造了现代辐射井, 建成后由于一眼辐射井的出水量相当于同含水层条件下 40 眼管井的出水量, 为英国解决了水荒问题, 凭借出水量大且工作可靠的特点, 后来在世界上很多国家得到广泛应用。我国在 20 世纪 70 年代引进后, 经过几十年的发展, 使得辐射井的性能更加可靠, 出水量提高, 为辐射井的快速发展奠定了基础。

在辐射井的开挖过程中, 水平钻机是最重要的

收稿日期: 2016-07-11; 修回日期: 2016-08-25

基金项目: 国家科技支撑计划“农机井成井设备研制与开发”(编号: 2015BAD20B02-05); 山东省科技发展计划“面向制造业新产品开发的专利规避设计关键技术研究”与“工具开发”(编号: 2014GGX106003)

作者简介: 尹书学, 男, 汉族, 1992 年生, 硕士研究生, 机械设计制造专业, 主要从事现代设备研究与分析, 山东省济南市南辛庄西路, 1563121915@qq.com。

设备,虽然我国近几年已经出现了一些企业生产钻机,但是仍然存在很多问题无法解决。其中有设计之初存在的原理性问题,也有后期加工生产过程中存在的问题。本文利用 SAPB 设计方法,对钻机的整体方案进行研究,通过对方案的研究,使得钻机的整体结构性能得到进一步提升,为我国民生建设做出贡献。

## 1 理论基础

SAPB 是把设计对象看作一个系统,用系统工程进行分析和综合,按设计进程有条理、有步骤地进行设计,以求得价值优化的最佳方案的一种方法<sup>[6-7]</sup>。Pahl 和 Beitz 在总结前人理论的基础上结合自身经验,从方法论的高度全面分析设计过程,提出了一整套较完整的设计方法学说,他们将该设计过程分为 4 个阶段:阐明任务、方案设计、技术设计、施工设计<sup>[8]</sup>。SAPB 的每个阶段都制定了准确的步骤,设计人员按照步骤进行设计,特别是在方案设计阶段,该阶段也是整个设计过程中最关键的一步,可以得出大量的方案<sup>[9]</sup>。

## 2 钻机总功能的分析

### 2.1 钻机总功能的抽象

功能是对技术系统或产品能完成的任务的抽象描述<sup>[10]</sup>,是反映产品所具有的特定用途及各种特性,是系统或子系统输入、输出时,参数或状态变化的一种抽象描述。

在对产品的总功能进行分析过程中,确定出设计任务之后,对其功能进行抽象化。从能量、信息、物质等方面,对系统中输入和输出之间的关系进行分析,合理、准确地描述出系统的功能。

在描述产品的功能时,SAPB 设计方法中一般规定采用“动词+名词”的形势来表达,及谓语句和宾语表达,该表达方法既简便,又突出重点<sup>[11]</sup>,例如洗衣机的功能就是“清洗衣物”;打夯机的功能就是“夯实地面”,而本文所涉及的水平钻机的功能就是“钻孔”。

### 2.2 黑箱法

在对一个相对复杂的产品进行设计时,起初设计人员是不了解产品的内部结构及其构成的,该过程就像是一个封闭且不透明的箱子,人们只能通过对其外部的观测研究,来分析箱子和周围环境的关

系,了解功能、特点,通过进一步分析,逐步地探寻内部的结构机理,该方法即“黑箱法”<sup>[12]</sup>。

而产品的总功能正是反映了输入量和输出量之间的关系,一般从物质、能量、信息等几个方面对其分析。在绘制“黑箱图”时,不同的流所用的线型也是不同的。一般能量流用细实线表示;信息流用虚线表示;物质流用粗实线表示,示意图如图 1 所示。

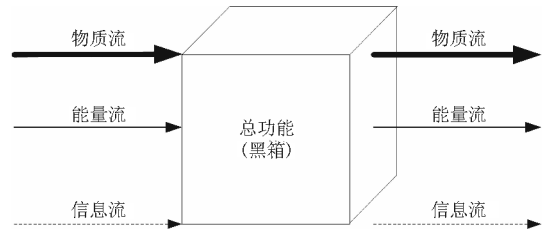


图1 黑箱法示意图

在分析了辐射井水平钻机的总功能为“钻孔”后,将从物质流、能量流、信息流几个方面,对钻机工作时的输入量和输出量之间存在的联系进行进一步分析。首先分析钻机工作过程中的物质流的输入与输出,由于钻机在施工时,是在辐射井内钻击地表,因此可确定输入有完整的地表;在钻进过程中为了便于排出切削下的土壤和砂石,需要用水冲击,确定输入水;钻机钻进的过程中离不开的一个重要工具是钻头,因此钻头也是一输入量。以上输入量经过钻机的钻进施工后,所输出的量即是带孔的地表、之前充入的水还会输出,而通过钻头的切削,还会出现土壤,同时钻头仍然存在,即确定出了物质流的内容。

钻机在工作时需要能量的输入,目前常用的提供能量有电能、机械能、液压等。由于钻机在井下作业时条件比较恶劣,而且会有大量的水和砂石存在,考虑到施工人员的安全和钻机施工过程中性能的稳定等因素,选择液压比较理想。在利用液压的同时,也离不开施工人员的操作,即可确定出能量的输入为人力和液压。而钻机在钻进过程中,输入的能量会发生转化,如会产生转矩带动钻头工作和转化为推力推动钻头实现进给;钻头不停地旋转产生热能,还会伴随着振动。通过该分析,即确定出了能量流的输入与输出量。

而钻机工作时的信息流就是通过开关的启动和停止,来实现控制信号的作用。图 2 为钻机的总功能黑箱图。

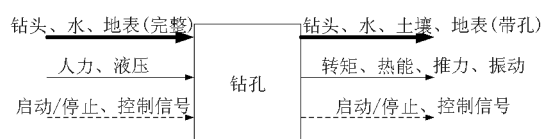


图 2 钻机总功能黑箱图

### 3 功能的分析

#### 3.1 功能的分解

不同的产品,所对应的功能结构复杂程度不同。对于一个功能结构比较复杂的产品来说,在确定出总功能后,为了对其产品进行进一步的研究分析,获得更加详细、具体的内部结构,对总功能进行分解。首先将复杂的功能结构分解为较为简单的分功能,如果分功能仍无法得到具体的解决方案,就对其分功能继续分解,直到能够得到具体的解决方案为止。对功能不断分解的过程实际就是对产品进一步深入认识的过程,通过总功能的分解,建立功能模型,以便于对产品的设计。

Allen<sup>[13]</sup>将功能分解分为 2 类:层次分解和非层次分解。层次分解有 2 种特点:不同级的子系统间有相互作用,这种相互作用可能是单向的也可能是双向的;父一级系统相同或不同的同一个级别的子系统也有相互作用。这种相互作用可能是单向的也可能是双向的<sup>[14]</sup>。这种类型分解过程中通用的分解图如图 3 所示。

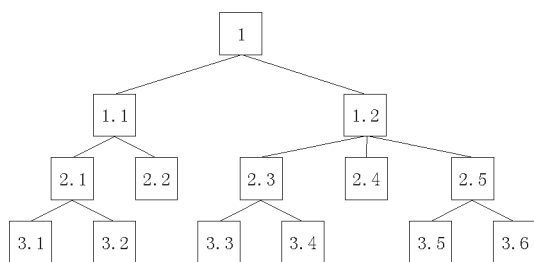


图 3 层次分解

结合本文的辐射井水平钻机,前面确定了钻机的总功能,由于水平钻机的结构功能比较复杂,因此在总功能的基础上对水平钻机进行进一步的功能分解。首先进行第一层次的分解,该阶段分为 3 个方面:为钻机提供的能量,钻机的基本功能就是移动土壤,钻机的使用操作方面,确保其使用安全。分解完第一层次的 3 个方面后,只是对钻机进行了一个初步的分解,无法得到相应的设计方案。

第二层次的分解,该阶段对第一层次的 3 个方面一次进行分解。在对钻机“提供能量”方面,结合

黑箱图,又分解为 2 个不同的部分:供应人力、供应液压。而在钻机的基本功能“移动土壤”方面,依靠钻机的钻头旋转切削作用,对地层坚硬的土壤进行切割,而切割下来的细碎土壤需要被移除到钻孔外面,否则会由于其存在,导致阻力增大,影响钻头的正常作业。通过分析,移动土壤方面又分解为切割土壤和移除土壤 2 部分,这 2 个部分缺少任意一者都会使钻机的工作无法正常进行。第三方面是钻机的使用安全,该方面看似没有前者重要,但是在水平钻机日常施工过程中,该方面设计的好坏会极大地影响到钻机的工作效率,因此该方面也是非常重要的一部分。在钻机施工时,由于作业时间长,施工人员长时间的操作会比较疲劳,为了更大程度上地减轻施工人员的劳动强度,因此要设计的结构易于操作人员的操作;同时钻机连接的钻杆每段大约有 1 m 长,在钻进过程中,需要多次更换钻杆,以固定钻头继续进行钻孔。为了提高工作效率和减轻施工人员的劳动强度,需要设计易于更换的钻杆,易于固定的钻头。通过第二层次的分解,在第一层次的基础上对钻机的功能结构有了更进一步的认识,但是还无法获得具体的解决方案。

第三层次的分解,通过第二层次的分解之后,得到了 6 个部分的子功能,由于无法获得详细具体的解决方案,需要对其继续进行分解。第一部分供应人力,可以分为输入人力和调节人力 2 个具体功能;第二部分的供应液压,首先针对液压所提供的功能分为 2 个作用,即形成推力和形成转矩。在水平钻机作业时,由于液压缸中的液压油的挤压作用,一部分液压缸中的力形成推力,推动钻机的钻头实现进给运动;还有一部分形成转矩,带动钻头作旋转运动,来切削土壤。对形成推力部分继续进行分解,一种是把液压缸中液压油的压力转换为推力,一种是将产生的推力传递出去;而形成转矩则分解为 2 部分,一种是将液压缸中液压油的压力转换为转矩,一种是将产生的转矩传递到钻头上。第三部分切割土壤需要动力来实现,为了完成切割土壤的功能,既需要有转矩的输入来带动钻头作旋转运动,又需要推力的输入来实现进给运动,即分为输入转矩和推力 2 部分。第四部分移除土壤,被分解为 2 步来实现,第一步是为了方便土壤的移除,需要用水进行冲击,使土壤形成泥浆;第二步是运输土壤,通过用水不断的冲击,使土壤在钻管内部流出。第五部分是易于

施工人员的操作,一方面是人力的参与,一方面是对液压系统的调节。最后一部分是钻头的固定,简单的分为2步:拆卸钻头和固定钻头。通过该层次的分解,使得水平钻机的各部分的分功能都变得比较明确、具体,使得钻机的每一部分的分功能都能够比较简单的获得具体的解决方案,达到了功能分解的效果。钻机的功能分解树如图4所示。

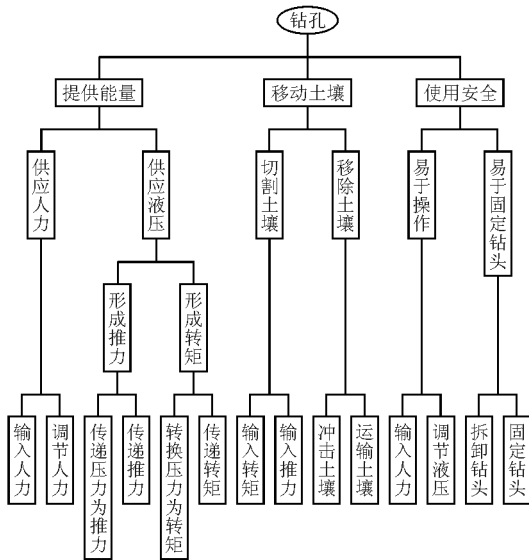


图4 钻机的功能分解树

### 3.2 功能元

功能元是既具有一定的独立性,又具有一定复杂程度的技术单元,是在方案设计中直接求解的基本单元。一般情况下功能元分为3类:物理功能元、数学功能元、逻辑功能元。

要想把分解的子功能联系在一起,组合成总功能,建立起产品的功能模型,必需靠一定的联系将功能元分成能量、物质、信息3个方面,联系在一起,来构成产品的功能结构关系,通常有3种基本形式:链式结构(串联)——各分功能按顺序相继作用;并列结构(并联)——各分功能并列作用;循环结构(回路)——分功能成环状循环回路,体现反馈作用<sup>[15]</sup>,如图5所示。

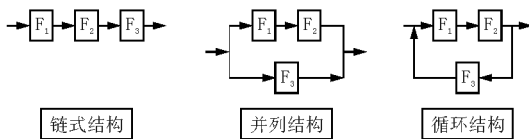


图5 功能结构关系

结合辐射井水平钻机的功能结构分解所获得的子功能,对其按照上述方法进行组合,获得水平钻机

的功能元图解(参见图6)。

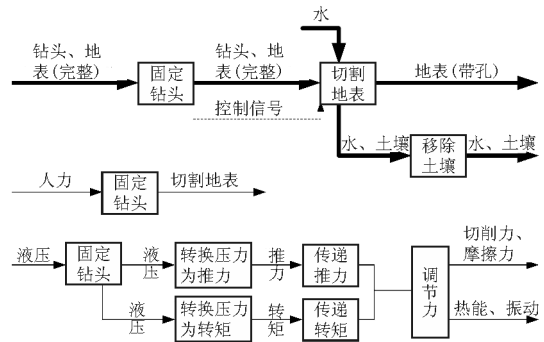


图6 钻机功能结构链

### 3.3 功能模型的建立

产品功能模型的建立是整个方案设计过程中最重要的一步。将前面获得的功能元流程图解,按照之间存在的联系进行组合连接,获得更加具体、详细的功能模型图。通过建立功能模型图,可以直接、明确地看出产品的各个子功能之间的联系,为确定每一部分的结构提供了极大的方便。

本文结合水平钻机,按照功能模型建立的步骤,将前面建立的每一个输入流的功能链按照一定的时间或空间顺序进行相互关系的组合,最终获得水平钻机的功能模型图(如图7所示),进而完成整套钻机的整体方案设计。

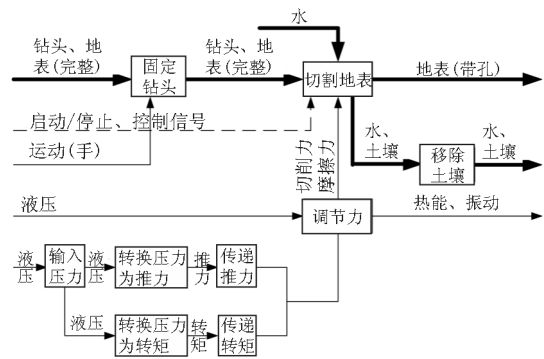


图7 钻机的功能模型

通过水平钻机的功能模型图的建立,可以较简单地确定出钻机各个子功能的具体结构,利用三维软件,建立水平钻机初步的三维模型(如图8所示)。

## 4 总结

本文将SAPB设计方法与辐射井水平钻机的设计过程充分融合,首先分析总结出钻机的总体功能,然后借助于SAPB方法中的“黑箱图法”对其在

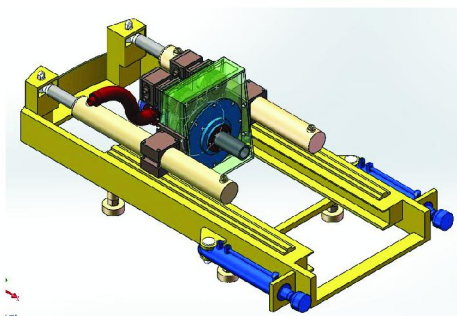


图 8 钻机三维模型图

物质流、能量流、信息流 3 方面进行分析,得到钻机的黑箱图;进而将总功能进行逐次分解,得到功能分解树,又通过输入流功能链的建立及其组合,获得了钻机的功能模型图,最终确定出每个子功能的结构,建立出水平钻机的初步三维模型。

#### 参考文献:

- [1] 邹峰.公理化六西格玛设计方法的研究[D].天津:天津大学,2007.
- [2] 张治晖.辐射井技术[J].中国水利,2008,(23):63.
- [3] 付刚.北京地铁降水方法研究与应用[D].吉林长春:吉林大学,2005:3-8.

- [4] 宋冬玲,李沛沛,刘盟.滨州市黄河滩地地下水开发与辐射井技术[J].地下水,2010,32(4):126-127.
- [5] 宋良华,刘景言,季超涛.灰坝渗漏治理的辐射井排渗设计[J].武汉大学学报:工学版,2011,(S1):229-232,240.
- [6] 唐林,邹慧君.机械产品方案的现代设计方法及发展趋势[J].机械科学与技术,2000,19(2):192-196.
- [7] 黄纯颖.设计方法学[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [8] 高常青,杨波,吕冰,等.科学效应在产品概念设计中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2014,(5):46-49.
- [9] 陈德志.基于 AD 和 TRIZ 的 SAPB 设计方法研究[D].福建福州:福建农林大学,2010.
- [10] 袁峰,王太勇,聂慧娟.基于创新设计理论/功能分析的机械产品功能原理创新设计[J].计算机集成制造系统,2006,12(2):205-209.
- [11] 高常青编著. TRIZ - 发明问题解决理论[M].北京:科学出版社,2011:32-37.
- [12] 密善民,赵贤,陈伟,等.产品概念设计过程研究[J].设计与研究,2014,(3):5-7.
- [13] Allen J K, Mistree F. Design of Hierarchical and Non - Hierarchical Systems [C]//Proceedings of the 1993 NSF Design and Manufacturing Systems Conference. Charlotte, NC, 1993.
- [14] Suh N P. Design - in of Quality Through Axiomatic Design [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2):256-264.
- [15] 梁艳红,檀润华.产品概念设计中的功能分析[J].河北工业大学学报,2007.

(上接第 102 页)

较低。说明大部分时间在做辅助工作。要想缩短现场施工周期,最好的办法是增加设备。

(6)危岩勘查钻探施工,应尽量不用或少用施工用水,避免因水的作用造成危岩体变形加剧,有条件时可用风动潜孔锤取心钻进。

#### 参考文献:

- [1] 余姝.重庆市巫山县望霞危岩应急勘查报告[R].重庆:重庆市地质灾害防治工程勘查设计院,2011.
- [2] 任良治,廖根权.钻探施工技术在危岩治理工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):278-280.
- [3] 任良治,梁峰,田贵维,等.某高切坡工程施工方法[J].西部探矿工程,2011,(4):1-3.
- [4] 张伟.科学深孔复杂地层钻进技术难题与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):7-12.
- [5] 李占锋.地表近水平孔绳索取心工艺钻探实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):48-50.
- [6] 常江华,凡东,刘庆修,等.水平孔绳索取心钻进技术在金矿坑道勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):40-43.
- [7] 罗永贵,古世丹,罗璇,等.深孔小口径金刚石钻进严重烧钻事

故的预防与处理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(3):37-40.

- [8] 周国锋,陈红刚,刘才高.无粘结预应力锚索在乌江索风营水电站 Dr2 危岩体加固中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):61-63.
- [9] 罗伟.破石山边坡 SNS 主动柔性防护系统综合治理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):73-76.
- [10] 李胜,尹亮先,章术,等.75mm 双管单动采煤管在薄煤层及粉煤钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):50-53.
- [11] 任良治,田贵维,李术.巫溪南门湾危岩带发育特征与防治措施[J].西部探矿工程,2011,(8):163-171.
- [12] 朱益明,王润伦,王亚凤.复杂采空区地质灾害治理钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):337-347.
- [13] 汤凤林, CHIKHOTKIN VF,高申友,等.关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):76-80.
- [14] 徐国辉,万道含,杨树强,等.青海省都兰县五龙沟矿区坑道钻探工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):34-37,45.
- [15] 王德强.岩土工程勘察外业工作的技术与措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(5):69-71.